



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114578888 A

(43) 申请公布日 2022. 06. 03

(21) 申请号 202011415099.3

(22) 申请日 2020.12.01

(71) 申请人 大连科欣仪表研究所

地址 116013 辽宁省大连市西岗区八一路杏园街9号

(72) 发明人 陈义新

(51) Int. Cl.

G05F 1/567 (2006.01)

H01J 43/30 (2006.01)

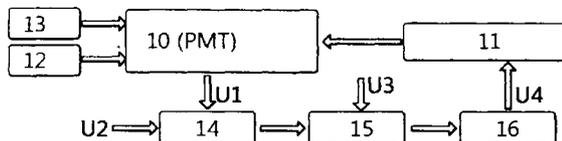
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

## (54) 发明名称

一种光电倍增管增益稳定方法

## (57) 摘要

一种光电倍增管增益稳定方法,是目前使用元器件数量最少,体积最小,成本最低,可靠性最高,简化到极致的PMT增益保持电路,由于其几乎无限的分辨率和极强的纠偏能力,在分析仪器产品中实际应用的效果非常理想,取代了公知的繁琐复杂的基于计算机技术的增益保持电路。



1. 一种取代了公知的基于计算机技术的PMT(光电倍增管)增益保持电路,其技术特征是,运用了精密运算放大器组成模拟调节电路,对PMT吸收基准辐射源形成的光电流数值与设定的电流数值的偏差进行比例积分运算,运放(17)的正输入端接地,负输入端接有电阻(19、20、21)和电容器(22)的一端,电阻(19、20)的另一端分别接在输入光电流U1和标准电压U2上面,电阻(21)和电容器(22)的另一端接在运放(17)的输出端,运放(17)的输出端通过常通的模拟开关(23)与电压保持器(18)的输入端连接,这个输入端还连接有一个保持电容(24),模拟开关的(23)控制端连接到测量仪器的中央控制系统并在它的控制下,在PMT测量光电流的过程中模拟开关关断,由电压保持器为PMT提供稳定无波动的负高压输出,测量光电流的过程结束以后模拟开关恢复导通状态。

2. 权利要求一所述的增益保持电路,其特征是,其电压保持器(18)可以是通用高输入阻抗运算放大器,或者是专用的电压保持器IC,例如型号LF398。

3. 权利要求一所述的增益保持电路,其特征是,保持电容(24)必须选用漏电流极小的有机薄膜电容。

4. 权利要求一所述的增益保持电路,其特征是常通的模拟开关(23)可以使用专用的IC电路芯片,也可以采用微型电磁继电器,前者的体积更小,速度更快,但是后者断开时的漏电流完全可以忽略不计。

5. 权利要求一所述的增益保持电路,其特征是,运算电路的比例系数K(增益)设计成 $>1000$ ,积分时间 $>10S$ 。

## 一种光电倍增管增益稳定方法

### 技术领域

[0001] 本发明通常涉及到一种光电倍增管的增益稳定的方法,特别是涉及自动化成分分析仪器的可见光光电检测系统的稳定方法。

### 背景技术

[0002] 光电倍增管(PMT)是一种高度灵敏的探测装置,用于将微弱光转化成放大的电信号。一个典型的PMT包括一个抽真空的玻璃管以及布置在该管内的一系列电极。这一系列电极包括一个光电阴极、一个聚焦电极、多个倍增电极(电子倍增器)、以及一个阳极(成倍的电荷在该阳极处积聚)。实际应用中,一个高电压源被连接在光电阴极和阳极之间,该阳极位于最高电位,而多个倍增电极的电位是逐次升高的。当多个入射光子(入射光)撞击该PMT的光电阴极时,由于光电效应,光电阴极射出多个光电子。从该光电阴极射出的这些光电子被一个电场加速,并且被该聚焦电极指引向该系列倍增电极。通过多个二次发射过程,该电子倍增器使这些光电子一次次倍增。当这些倍增的光电子最后到达阳极时,它们作为一个电信号被输出。由于以上多次的倍增过程,即使来自该光电阴极的一个及其微小的光电流也可以在该PMT的阳极处提供一个很大的输出电流。可以被称作“增益”的这种放大取决于倍增电极的数量、加速电压、温度等,通常可以达到数百万倍,理论上可以检测到一个光子。PMT以其高灵敏度、快速响应特性,在高能物理领域应用十分普遍,在微弱的化学发光、荧光分析领域也被大量应用。

[0003] 但是PMT的增益不是稳定不变的,而是随许多外部因素和自身的因素影响而变化,其中影响最大的是供电负高压的影响,文献报道负高压每变化1%,光电倍增管的增益要变化15%,所以为PMT配套的负高压电源稳定性要求变化不大于0.02%,按照这个要求制作的负高压电源,要使用恒温的高精度基准电压源,有一大堆用温度系数最小的锰铜线绕制的取样电阻,体积大造价高,使用十分不便。PMT自身的温度系数如何补偿,也是十分复杂的,通常是预先测定出它的实际的温度系数,再测出它所处的使用环境的实际温度,再进行温度系数补偿运算。

[0004] 尽管这些都做到了,可是还有一项非常重要的特性是难以用公知的方法进行补偿的,就是PMT和所有的光电接收元件一样,都具有“光疲劳”现象,具体表现为:PMT处于黑暗中时,它具有很高的光电灵敏度,接受光线照射后,灵敏度急剧下降,在两次测量之间间隔一段时间,肯定会得到不一样的结果。由于这样的测量方式是开环的,其增益是不可控制的,成为仪器性能漂移的一项重要因素。

[0005] 在自动化测试和控制技术中,使用基准源已经是最重要最基本的部分,从早期的标准电池,到现在各种高精度的基准电压源,提供了模拟比较或者是A/D转换必须的测试基准。那么能否也提供一种类似的方法对于PMT的增益进行调节,使其处于一个相对稳定的状态,所有很早就有许多人提出了使用参考辐射源为基准,基于自动控制的闭环增益调节系统,并且已经申请了大量的类似原理的专利,下面仅仅列出几个比较典型的例子:

[0006] ①申请号:201010228915.X基于参考辐射源来检测出闪烁检测器的增益的变化,

确定增益的变化量,再输出控制信号来补偿增益变化;以及基于所述控制信号,稳定相对于参考辐射源的增益。

[0007] ②申请号:200310117175.2对低能参考源和被测源产生的能谱脉冲信号进行放大;对两个放大的能谱脉冲信号分别进行检测,去调节系统的增益。

[0008] ③申请号:200610171576.X闪烁检测器内部的LED发光时光子通过闪烁体传导至光电倍增管,控制计算单元根据需要控制LED的发光强度、数量,并根据温度传感器的探测参数对LED的发光强度进行自动补偿;数字前置放大电路单元根据探测到的LED发光参数,进行A/D转换后与正常探测器系统应该得到的数量和强度位置进行比较,通过比较所得的差值计算出探测器系统各参数的变化量后,通过系统自动调节数字增益和数字设阈量,使得系统恢复到正常状态,实现系统的自检测和自刻度。

[0009] ④申请号:200710138443.7闪烁晶体中包含校准源,校准源包括少量有效的已知能量频谱辐射源。例如铯-137,因为这样的源材料基本上发出能量是662keV的单色伽马光子,由能执行嵌入式计算机程序的控制器对高电压源施加控制。

[0010] ⑤申请号:201720906974.5该装置包括校准射源和至少两路比较器、计数模块、温度传感器和单片微型计算机,每一路比较器均与光电器件通信连接以将不同能量段的模拟电压信号转换为数字脉冲信号;计数模块分别与每一路比较器通信连接并同时测量数字脉冲信号的计数率;温度传感器实测闪烁探测器表面温度数据;单片微型计算机与计数模块通信连接并根据计数率和实测温度数据计算目标增益以及校正电压;高压电源与单片微型计算机连接以接收校正电压。

[0011] 以上述例子为代表的,公知的各种使用参考辐射源为基准,基于自动控制技术的闭环增益调节系统,大同小异,毫不例外的都采用了能执行嵌入式计算机程序的基于处理器的控制器、专门开发的软件、以及必不可少的信号前置放大(调理)电路,高分辨率的A/D转换器,高精度的基准电压发生器,最后还是要用高分辨率的D/A转换器,将基于处理器的控制器,通过复杂运算得到的运算结果,再转换回模拟信号,去控制输出可调的高压电源,进行增益调节。

[0012]

[0013]

[0014] 这样的调节系统,电路及其专业软件非常复杂,对于一些常用的仪器,硬件成本相对太高,体积也太大,软件开发费用太高,电路的功耗也是太大了。既然输入的光电信号是模拟量,输出也是一个模拟量,为什么不能直接进行模拟运算,将这个调节系统简化到极致。

## 发明内容

[0015] 本发明就是按照这个思路,对采用纯模拟运算方案,还是采用包括A/D和D/A转换电路的全数字化全智能化运算方案进行了各个方面详细的比较,除去零部件物理成本、专用软件开发成本、体积、耗电等应用中必须考虑的因素,精度是最重要的因素。现在的计算及控制技术,设计和制造一个16位(分辨率1/65536)乃至20位(分辨率1/1048576)的A/D和D/A转换电路的控制部分都不是问题,问题是做出来一个精度达到万分之一的模拟电阻都是非常困难的,特别是要在一个小小的芯片上做出来一大堆完全一致的、极高精度、极小温

度系数的模拟电阻网络,几乎就是不可能的任务,加之基准电压源的精度和温度漂移、噪音等多种性能因素的实际影响,所以高分辨率并不等同于实际应用所能够达到的高精度。这也是为什么在实际应用中,更多使用的是12位(分辨率1/4096)甚至是10位(分辨率1/1024)的A/D和D/A转换电路。常用的A/D和D/A转换电路,绝大多数都是采用0~+5V的输入输出电压标准,对于12位A/D和D/A转换电路,最小的分辨率相当于1.22mV,就显得很粗糙了,比如用0~+5V的输出电压去控制0~-1500V输出的负高压电源,1.22mV控制电压对应0.366V负高压输出的变化,当实际应用-500V时,相当于1/1366,在[0003]提到,负高压每变化1%,PMT的增益要变化15%,故PMT的增益要变化 $(1/1366) \times 15$ 倍,即1/91,相当于1.1%,这已经对待测的光强数值产生很大的影响了,换一个角度讲,这样是无法做到精细调节的。即使是名义上16位的A/D转换电路,最小的分辨率也相当于76.3 $\mu$ V。专用的软件还要设计一个阈值,只有经过A/D转换电路多次采样检测到的由基准辐射源产生的光信号电压,与预设电压相比较,产生了一定的偏差,确认突破了设定的阈值,控制部分才能采取纠偏的行动,理论上这个阈值电压,毫无疑问是要大于A/D转换电路最小的分辨率的。所以数字化系统难以精确的调节PMT的增益。例如在背景材料④提供的效果说明,当施加到光电倍增器的典型电压在800到2200V的范围内,高电压电源的电压输出可调整到1-5V的精度,在该发明的申请人看来,这个数值确实已经达到了非常不错的水平,但是本发明在800到1200V的范围内,高电压电源的电压输出可调整到负高压电压表的最小显示位数0.1V,因为本发明与上述数字化系统不同之处是,模拟信号的分辨率是无限的,运算放大器对于哪怕是小于1 $\mu$ V的偏差电压,也会进行及时的纠正,是不用设定也不存在阈值电压的,所以在实际应用中,效果是非常理想的。

## 附图说明

[0016] 图1是公知的各种使用参考辐射源为基准,基于自动控制技术的闭环增益调节系统,简化画成方框图,就如同附图1所示:1是PMT,由可控的0~-1500V输出的负高压电源2供电,在PMT的光输入窗口,有基准参考辐射源3和需要被测量的未知光强度的辐射源4,PMT输出的光电流,经过信号前置放大(调理)电路5处理后,由A/D转换器6转换为数字量,输入能执行嵌入式计算机程序的基于处理器的控制器7,专门开发的硬件、软件构成的增益和阈值设置电路8对控制器7进行调控,控制器的数字化输出,要由D/A转换器9转换为0~+5V的模拟电压,再去控制负高压电源2的输出电压,完成一个大的闭环控制系统。图2就是本发明按照这个思路开发的一个成功例子,也用方框图表示,10是PMT,由可控输出的负高压电源11供电,在PMT的光输入窗口,有基准参考辐射源12和需要被测量的未知光强度的辐射源13,这些与附图1的这部分完全相同。不同的是调节系统14是由运放和外围阻容元件构成的PI(比例积分)调节器,它的输出电压经过一个常闭的模拟开关15传递到电压保持器16,电压保持器16的输出去控制负高压电源11,完成一个大闭环反馈控制系统。由于电信号是直通的,没有任何的延迟,没有任何A/D和D/A转换电路,也没有最小的分辨率对调节精度的影响,更没有“死机”“臭虫”,简单到了极致。

[0017] 与图1相比较,图2极其简约。仅用了一个双运算放大器IC,一半用来做PI调节器,一半用来做电压保持器,加上外围的必需的阻容元件,以及一个微型电磁继电器(如果用模拟开关IC,体积更小),全部物理成本不足10元人民币,体积比1元硬币还小一点,使用效果

却非常理想,与在此之前发明人花了很大力气开发的,按照公知的方法制作的调节系统相比较,各项技术指标毫不逊色,甚至还要高出许多。这个也很好理解:现在的高精度运算放大器,性能极其接近于理想放大器,增益极高,输入阻抗极高,温度漂移和失调电压极低,噪声电压极低,可以非常方便地设计成为各种用途的电路。模拟信号的分辨率是无限的,最终结果可以是高精度的。对于许多没有什么特殊程序的要求,仅仅用来进行比较放大输出的场合,这正是运算放大器的拿手好戏,“运算”放大器在本发明的应用恰恰是名副其实。图3是本发明的一个最佳实施例的电原理图。实施例中表示被测试的光电流U1与参考辐射源(LED)形成的标准电压U2的实际关系,有两种方案,图4表示方案A,图5表示方案B。

[0018] 需要说明有两种设计方案的区别:设计方案①是参考辐射源(LED)光强度调整到某一个常用的水平,稳定不变化。光电流(实际应用中都已经转换为电压U1)与一个可调节的标准电压U2相比较,得到的差值经过放大后,变成一个输出的控制电压U3,加在给PMT供电的专用高压电源的控制输入端,用来控制输出电压增高或者降低,达到了调节PMT的目的。设计方案②是标准电压U2稳定不变化,参考辐射源(LED)光强度是可调节的。两种设计方案的效果在实际应用中并没有明显的差别。

### 具体实施方式

[0019] 图3是本发明的一个最佳实施例的电原理图,简洁到了极致的程度,需要声明的是,这个是本发明的一个最简化的实施例,按照此思路的添加改进,也包含在本发明的范畴内。这个最佳实施例不包括正负电源和基准电源,仅有7个元件。实施例中17和18是完全相同的高输入阻抗的双运放IC,其中左半边运放17与外围阻容元件构成了一个PI(比例积分)调节器,对光电流U1与标准电压U2相比较得到的极小的差值进行放大,这个标准电压U2也就是设置的PMT增益数值,调高U2,负高压电源的输出电压就会相应的升高,而参考辐射源(LED)光强度虽然没有变化,光电流U1也会因负高压电源的输出电压的升高而升高,重新达到平衡,相当于PMT的增益变高了,反之亦然。运放17的正输入端接地,负输入端接有电阻19、20、21和电容器22的一端,电阻19、20的另一端分别接在输入光电流U1和标准电压U2上面,运放17的负输入端构成了相加点。为了简化设计,推荐电阻19、20使用相同的阻值。电阻21和电容器22的另一端接在运放17的输出端,构成了PI运算所必需的反馈电阻和积分器。U1、U2和电阻19、20、21以及输出电压的运算关系,属于公知的技术范畴,本说明书不再累述,这里仅说明两点:为了具有强烈的纠偏能力,电路的比例系数K(增益)设计的比较大,推荐 $K > 1000$ ,所以电阻21的阻值非常大。由于PMT系统增益的漂移变化都是非常缓慢的,积分运算的时间常数设计也是非常大,所以与电阻21匹配的电容器22的容量也是很大的。这样设计的结果是运放17的输出端是没有电压突变的,但是光电流U1与标准电压U2相比较得到的极小的差值(微伏级的),经过一段时间的积分作用,也会被充分放大,被运放17及时的进行调节控制。参数选择合适的前提下,即使输入的U1或者U2发生突变,整个调节系统也能在2至3个震荡周期内达到完全平衡的结果,完全符合设计使用要求。这个设计也是没有调节阈值设置的,输出的控制电压随时随地死死地跟踪相加点的电压变化,哪怕是小于 $1\mu\text{V}$ 的偏差也会得到及时的纠正,这一点也优于数字式调节方式。

[0020] 运放18接成了输入阻抗极高、输出阻抗极低的射随输出器形式,在输入端接有保持电容24,构成了电压保持器,输出电压U4去控制负高压电源的输出负电压,模拟开关23是

常闭型的,受仪器系统的开关信号U3的控制,在系统对待测的光强度进行测量之前的瞬间,将运放17的输出电压与运放18的输入端切断隔离,由于保持电容24选用的是有机薄膜电容,它的漏电极小,小到可以完全忽略,而运放18的输入阻抗极高,又接成了输入阻抗更高的射极输出器形式,更不会去泄放电容24的电量,所以在整个测量期间电容24的电压没有觉察到的任何下降,使得负高压电源的输出电压在整个测量期间 $t_1$  保持不变,PMT在相对比较短时间的整个测量期间内,增益也保持不变。测量期间结束后,模拟开关23重新接通,整个系统重新按照基准辐射源的光强度调节负高压电源的输出电压,使之再一次平衡在原有的水平上。

[0021] 实施例中表示被测试的光电流U1与参考辐射源(LED)形成的标准电压U2的实际关系,有两种方案,图4表示方案A,是参考辐射源(LED)光强度不变,形成的标准电压U2维持在一个较低的水平上,通常不超过被测试的最大的光电流(满度值)U1的10~20%,在测量之前,先将模拟开关23关断,使负高压保持不变即PMT的增益保持不变,测量期间结束后,模拟开关23重新接通,形成了关断的时间 $t_2$ 。测量时,在一个测量窗口 $t_1$ 内,被测试的光电流U1叠加在标准电压U2上,由测量专用软件处理掉标准电压U2的影响。

[0022] 图5表示方案B,方案B与方案A的不同之处是,在测量之前,先将模拟开关23 关断,使负高压保持不变即PMT的增益保持不变,再将参考辐射源屏蔽或者切断电流(对于LED),此时PMT的光电流U1立即下降到非常非常接近0V,只有及其微弱的pA级的暗电流,可以忽略不计或者由测量专用软件处理掉,然后才进行U1的测量。测量期间结束后,参考辐射源恢复(LED重新发光),模拟开关2也重新接通,整个系统复原。所以在图 5有3个时间窗口, $t_1$ 是测量窗口,输出的是被测试的光电流数值, $t_2$ 是模拟开关23关断的时间, $t_3$ 是参考辐射源屏蔽或者切断的窗口时间,此时U1下降到0V,按照前面所述的工作程序,必须是 $t_1 < t_3 < t_2$ ,便可以正常工作。现代分析仪器都是按照固定程序进行工作的,多引出2个控制端(因为测量窗口 $t_1$ 是原来就有的)来控制 $t_2$ 和 $t_3$ 只是举手之劳。

[0023] 实际应用时,也可以选用专用的内设模拟开关的电压保持器IC,例如型号LF398,来取代实施例中的运放18和模拟开关23构成的电压保持器,不仅使元器件数量、体积进一步减小,由于LF398的取样时间最短仅需要6微秒,在一些特殊的应用场合是很适用的。作为基准辐射源的LED,发光强度是受到温度影响的,如何控制LED的发光强度、数量,并根据温度传感器的探测参数对LED的发光强度进行自动补偿,已经有许多文献予以阐述,本发明不再一一说明。

[0024] 综上所述,本发明提供了一种元器件数量最少,体积最小,成本最低,可靠性最高,返璞归真简化到极致的PMT增益保持电路,由于其几乎无限的分辨率和极强的纠偏能力,在分析仪器产品中实际应用的效果非常理想,取代了公知的繁琐复杂的基于计算机技术的增益保持电路。

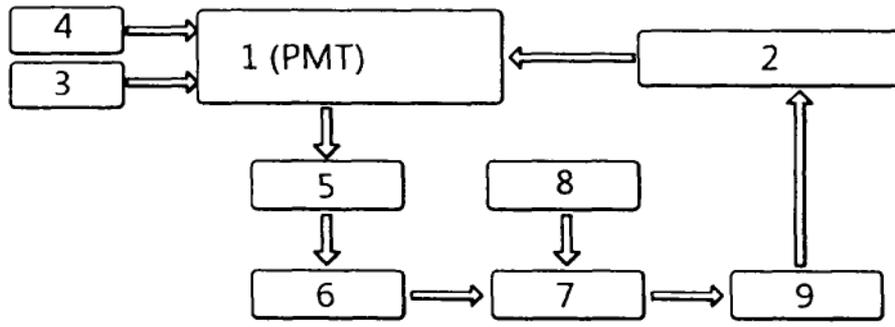


图1

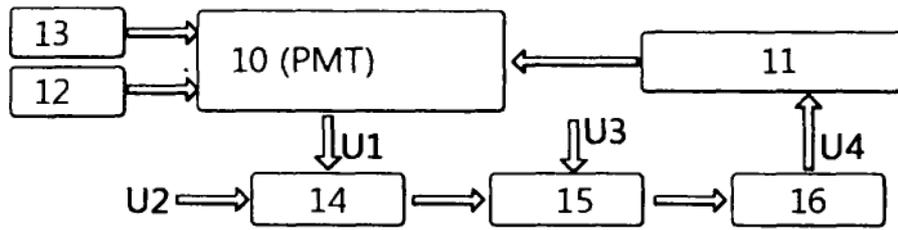


图2

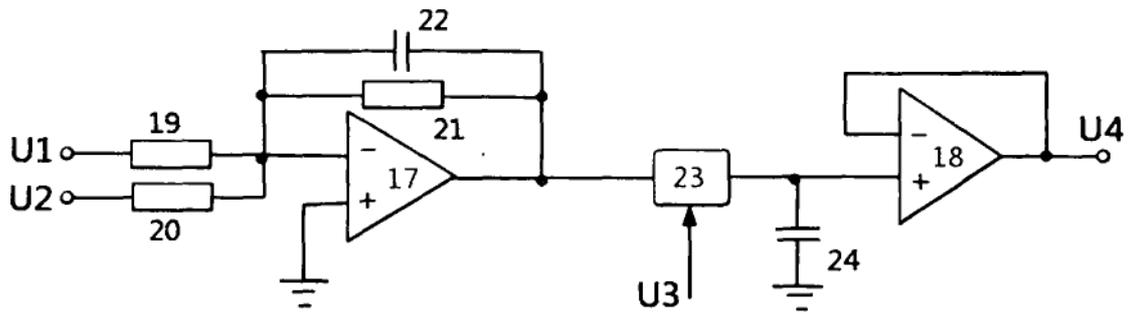


图3

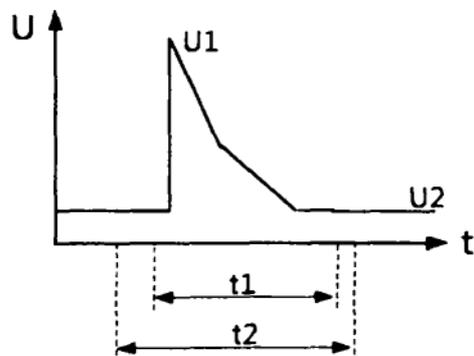


图4

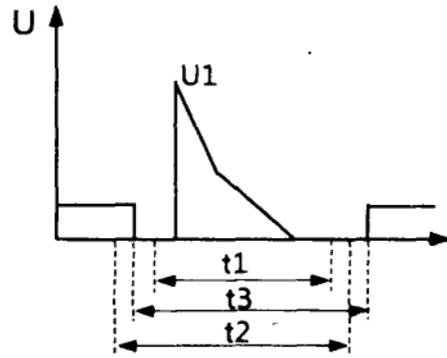


图5